引用格式：夏祥鳌，田玉芳，武云飞，等. 从边界层到中高层大气的气候环境综合探测与科学研究. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 1077-1087

Xia X A, Tian Y F, Wu Y F, et al. Integrated observation and research on climate and environment from boundary layer to middle and upper levels of atmosphere. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(7): 1077-1087

从边界层到中高层大气的气候环境综合探测与科学研究

夏祥鳌　田玉芳　武云飞　杨 静　吉东生　张金强　张仁健*　王普才　陈洪滨　郄秀书　吕达仁

1 华北香河气候与环境综合野外科学观测研究站　廊坊　065400

2 中国科学院大气物理研究所　北京　100029

摘要　经过50年的发展，中国科学院大气物理研究所华北香河气候与环境综合野外科学观测研究站（以下简称“香河站”）已具备从边界层到中高层气候环境的综合探测能力，加入了多个国内外大气探测网，是国际上少有的大气综合野外科学试验站。21世纪以来，香河站开展多次国际大型综合观测试验，在长期连续观测数据基础上，开展了中高层大气能量传播和物质交换、边界层大气物理化学和空气质量、太阳能监测预报等基础和应用研究，取得了一批有显示度的研究成果。继往开来，香河站将深耕先进探测仪器设备研制和更新改造，提升中高层大气热动力探测和边界层物理化学过程探测能力，建成集观测、试验和研究于一体的野外大气综合探测基地，提升对中层大气基本过程、上下大气层交换过程和机理、污染减排天气气候和环境效应等问题的科学认识，为我国在全球气候与环境议题上取得话语权和国家安全提供科技支撑。

关键词　臭氧，MST雷达，气溶胶-云-辐射相互作用，大气污染，碳监测

CSTR　32148.14.CASbulletin.20230627002

工业革命以来，随着社会生产力的大幅提高，人类活动向地球大气排放的污染成分也大幅增加，严重影响了地球大气的物理、化学和辐射性质，导致了全球气候和环境显著变化。全球气候变暖背景下极端天气气候事件的频繁发生，也对经济社会和人民生命财产安全等产生了深远影响。研究人员在代表性野外台站采用先进观测仪器设备，针对关键气候环境要素开展长期连续高质量探测，特别是针对复杂过程的集成

*通信作者

修改稿收到日期：2023年7月2日

探测，是深入理解人类活动气候环境效应的重要基础，将显著促进对区域乃至全球气候环境变化及影响的深入认识，服务国际经济社会发展，促进国家可持续发展战略的实施，对于气象和气候防灾减灾和国防安全都具有重要科学意义和社会价值。

中国科学院大气物理研究所（以下简称“大气所”）于1973年在河北省香河县建立香河大气综合观测试验站，21世纪初加入中国科学院日地空间环境观测网络，成为中国科学院开放站，2020年更名为华北香河气候与环境综合野外科学观测研究站（以下简称“香河站”）。建站初期，香河站主要以激光、毫米波测雨雷达和微波辐射计等高新大气探测技术研发为工作重点。在20世纪70年代末香河站开始高空气球的研发工作，现已具备研发定压和超压高空气球能力，多次为重大活动提供保障服务。始于1979年的臭氧观测，历经数代人的不懈努力延续至今，获得了我国最长的臭氧总量观测时间序列，加入世界臭氧和紫外辐射数据中心（WOUDC），为研究平流层臭氧耗损等科学问题提供了基础数据。20世纪80年代，香河站开展了甚高频中高层大气雷达（VHF/ST雷达）研发。21世纪以来，香河站相继加入全球气溶胶监测网络（AERONET）和国际基准地面辐射观测网络（BSRN），多次开展气溶胶-云-辐射联合观测试验和空气质量外场观测试验。经过近半个世纪的发展，香河站已建成为从边界层到中高层大气多成分和多要素综合观测实验基地，包括对流层-平流层-中间层（MST）雷达、高空气球、GPS数字臭氧探空仪、Dobson/Brewer紫外光谱仪、中高层大气放电探测系统、云-气溶胶-辐射观测系统等，并取得了一系列重要成果，在东亚中纬度地区大气探测领域具有不可替代的作用，已成为在国内外有知名度和显示度的野外科学观测研究站。

1 MST雷达连续探测获取惯性重力波及湍流参数特征与分布的新认识

香河站MST雷达是国家重大科技基础设施“子午工程”（以下简称“子午工程”）支持建设的大型核心设备之一。MST雷达利用大气湍流等活动造成的大气折射率不规则体对雷达发射电磁波的散射，实现对流层—下平流层（3—25 km）、中间层—低热层（60—90 km及以上）水平风、垂直速度、湍流等的全天时高时空分辨率（垂直分辨率≤150 m；时间分辨率≤30 min）连续探测，是探测研究全大气层多尺度动力学（风场、波动、湍流等）特征、过程及大气上下层耦合的独特且重要的手段。

自2011年起，MST雷达为“子午工程”及中国科学院日地空间环境观测研究网络提供高质量连续观测数据，服务保障了多次航空航天探测任务，多次获得“子午工程”个人和集体荣誉。在雷达探测能力验证、反演算法发展改进、大气重要参数提取算法研究，大气重力波、湍流特征研究等方面取得了一批成果：① 通过与无线电探空及流星雷达数据比对分析，验证了MST雷达在对流层-下平流层以及中间层-低热层的探测能力与水平风场数据的可靠性[1,2]，与HWM07模式、ERA-Interim再分析数据月平均纬向风时空分布对比，均显示MST雷达对3—25 km及65—100 km大气水平风有很好的探测能力（图1），可在大气上下层动力耦合方面发挥作用。② 发展了2种功率谱数据反演算法，有效去除飞机杂波等的干扰，显著提高了垂直速度、谱宽等反演精度[3]，构建了高质量的数据集，获得授权专利1项[4]，发展的反演算法适用于相同探测原理的风廓线雷达。③ 发展了准确提取各采样高度重力波参数的方法，获得了对流层—下平流层惯性重力波参数特征与波源的新认识，该方法将MST雷达观测到的重力波经向扰动分解为能量上传与下传波动，使得研究结果更加严谨准确（图2）。④ 基于改进的谱宽数据等，首次评估了国际常用湍流参数计算3种模型的适用性[5]，并首次获得了我国大陆区域对流层—下平流层高时空分辨率湍流耗散率与垂直湍流扩散系数[6]，时空剖面如图3所示，为模式提供重要实测参数。

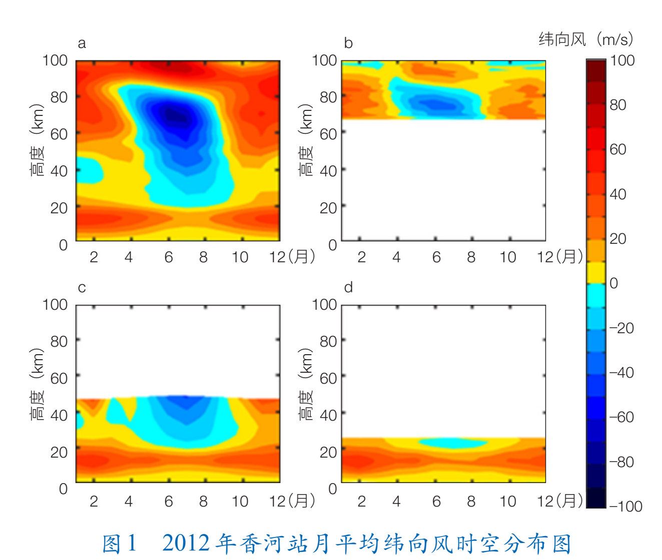


图 1　2012 年香河站月平均纬向风时空分布图

Figure 1　Time-altitude distribution of monthly mean zonal wind in Xianghe station of 2012

（a）HWM07 模式；（b）MST 雷达在中间层-低热层的探测结果；（c）ERA-Interim 再分析；（d）MST 雷达在对流层-下平流层的探测结果

(a) HWM07 model; (b) MST radar observations in mesosphere-lower thermosphere; (c) ERA-Interim data; (d) MST radar observations in troposphere-lower stratosphere

香河站 MST 雷达维护和数据分析团队从雷达原始数据处理、算法改进获得的经验，以及在对大气多尺度动力研究中提炼的科学问题，为“子午工程”二期青藏高原分系统在西藏羊八井 MST 雷达的优化设计和数据应用提供了很好借鉴。香河站科研团队充分结合科学研究与先进探测技术，确保从科学目标、探测模式、信号数据处理到应用研究多链条多层次的系统总体规划与长期先进性，未来有望实现多 MST 雷达组网共同观测，为基础前沿和应用问题的研究提供重要数据。

2 臭氧观测揭示北半球中纬度地区臭氧年际和年代际变化特征

大气臭氧含量是全球气候和大气环境研究中的重点关注对象。约 10% 的臭氧存在于对流层，是重要的温室气体和污染气体；约 90% 的臭氧存在于平流层吸收太阳紫外辐射，是地球生态系统的保护伞，也直接影响平流层温度层结，调节大气环流和全球气候。自然和人类活动导致的对流层和平流层臭氧变化备受关注。香河站开展的 Dobson 臭氧总量观测数据显示：1984 年智利 El Chichon 火山和 1991 年菲律宾 Pinatubo 火山喷发的硫酸盐气溶胶通过化学过程影响了中纬度平流层臭氧浓度；20 世纪 90 年代之前人为前体物氟利

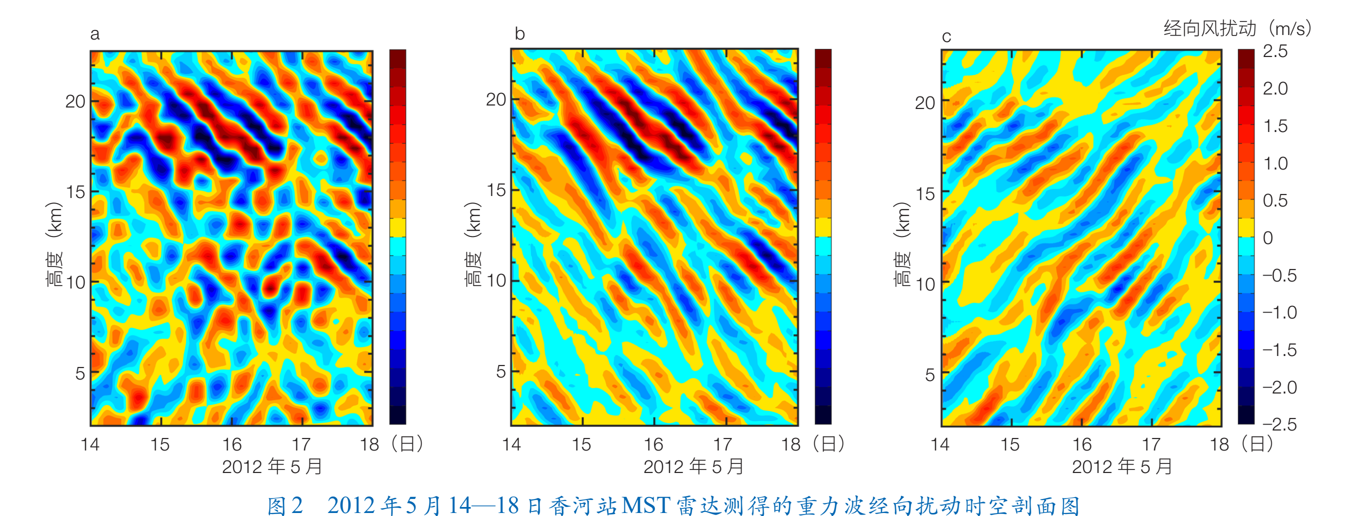


图 2　2012 年 5 月 14—18 日香河站 MST 雷达测得的重力波经向扰动时空剖面图

Figure 2　Time-altitude sections of meridional wind fluctuations associated with gravity waves observed by MST radar in Xianghe station during 14–18 May 2012

（a）经向风扰动；（b）重力波能量上传时的经向风扰动；（c）重力波能量下传的经向风扰动

(a) Meridional wind fluctuations; (b) decomposed meridional wind fluctuations associated with energy upward propagating gravity waves; (c) decomposed meridional wind fluctuations associated with energy downward propagating gravity waves

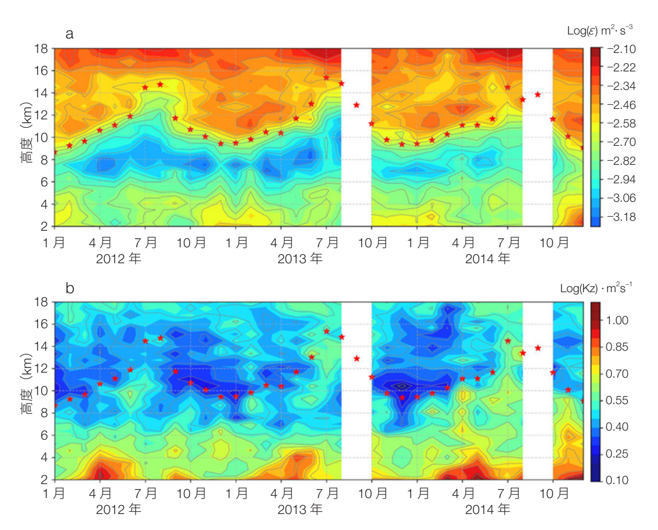


图3　2012—2014年香河站MST雷达测站上空对流层—下平流层湍流耗散率（a）与垂直湍流扩散系数的时空剖面（b）[6]

Figure 3　Time-altitude distributions of turbulence energy dissipation rate (a) and vertical eddy diffusion coefficient (b) calculated using MST radar observations in troposphere and lower stratosphere over Xianghe station in 2012–2014[6]

红色星号表示应用探空数据计算的对流层顶高度

Red stars indicate the tropopause height obtained using the Beijing radiosonde observations

昂等物质的排放导致中纬度地区臭氧的耗损[7]，此后香河站臭氧总量总体呈上升趋势，而2010年以来臭氧总体水平呈下降趋势（图4）。

香河站科研团队自主研制了单池和双池臭氧探空仪[8]，并利用该仪器开展了长达20余年的观测[9]，获取了我国大陆地区目前唯一的长期臭氧廓线探测数据集。与Dobson臭氧仪测量的臭氧总量对比验证了臭氧探空仪测量的可靠性（图5）。基于臭氧廓线长期探测，结合数值模式，研究揭示了香河对流层臭氧变化趋势，并量化了人类活动和自然过程的相对贡献。2002—2010年，香河对流层臭氧呈现明显上升趋势，特别是夏季对流层臭氧上升趋势非常显著，主要原因是对流层光化学生成，动力过程次之[10]。2013年实施主要污染物总量减排控制措施后，香河对流层臭氧呈现缓慢但不显著的上升趋势。

3 高建筑物上行闪电和中高层瞬态发光现象的始发机制研究

随着城市的发展和清洁能源的使用，城市高楼、通讯塔、风力发电风车等高建筑物逐渐增多，自然界中的上行闪电也引起越来越多的关注。自2008年起，香河站就架设了闪电定位仪，通过多站组网，对发生在北京地区的闪电进行实时定位，并可以实现闪电通道的三维定位[11,12]。研究表明上行闪电通常由附近闪电活动所诱发，绝大多数是被正极性地闪诱发，特殊条件下也会自发产生上行闪电[13,14]，此外还取决于正地闪的云内先导结构，其中云闪始发型正地闪的“上正下负”的先导结构有利于上行闪电的始发，当下层水平发展的负先导经

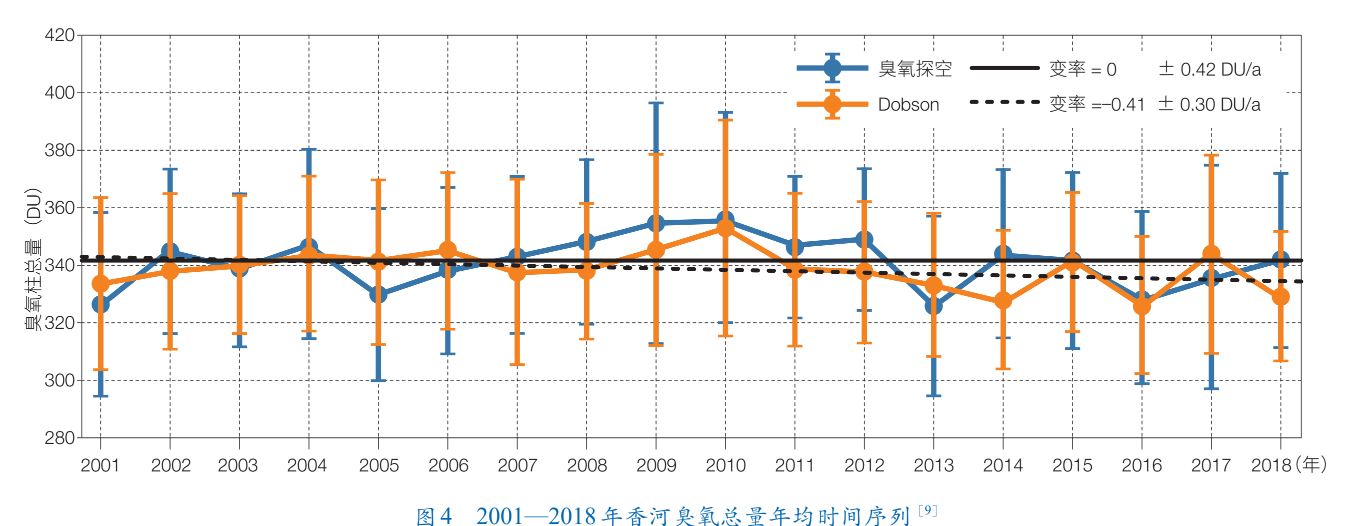


图4　2001—2018年香河臭氧总量年均时间序列[9]

Figure 4　Time series of annual column ozone content over Xianghe during 2001–2018[9]

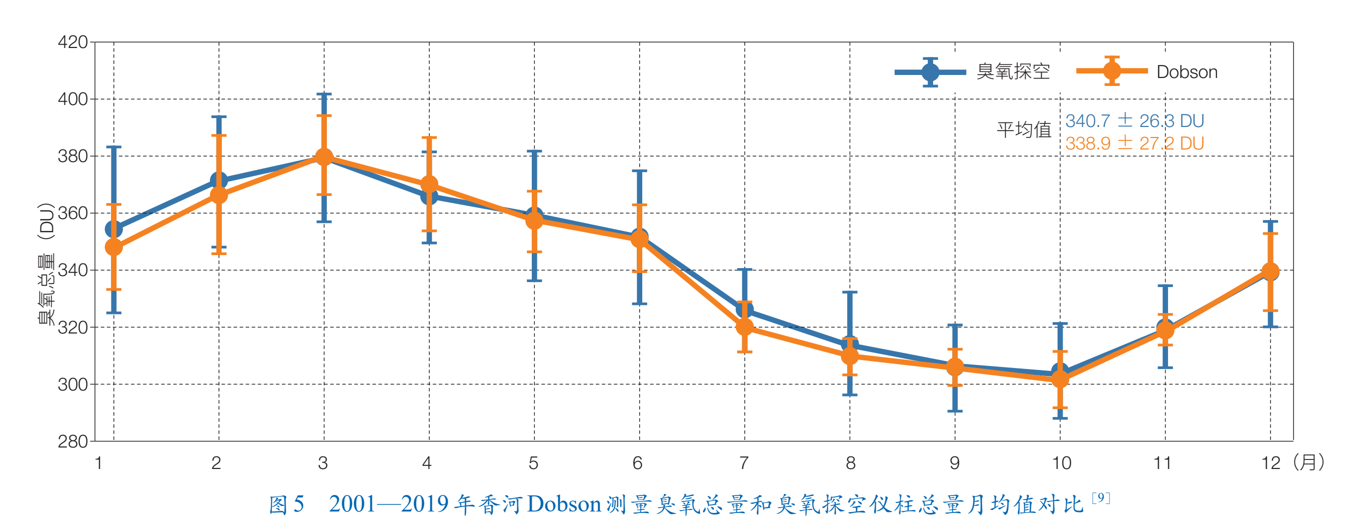


图5　2001—2019年香河Dobson测量臭氧总量和臭氧探空仪柱总量月均值对比[9]

Figure 5　Comparison of monthly average column ozone content over Xianghe from Dobson and ozonesonde measurements from 2001 to 2019[9]

过高建筑时，容易诱发上行闪电（图6）[15]。

对流层雷暴不仅会产生云闪、自雷暴云向地面发展的地闪，而且还会在雷暴云上方产生瞬态发光现象（TLEs）。瞬态发光现象出现在雷暴云顶和低电离层之间，可以自雷暴云顶向上发展直达低电离层，穿过几个大气层，对各大气层间的物质能量交换有重要影响，是大气和空间物理研究的重要前沿领域。研究高层大气瞬态发光现象对于临近空间的环境保障和开发利用也具有重要的应用价值。我国大陆高层大气瞬态发光（称为“红色精灵”）形态主要包括胡萝卜状和圆柱状，空间延伸在40—90 km之间，持续时间通常为几十ms[16,17]，绝大多数“红色精灵”由对流层正地闪（将雷暴云内正电荷转移到地面）产生，负地闪产生的“红色精灵”很少；研究发现不仅大峰值电流的负地闪（> 90 kA，大多数超过100 kA）能产生“红色精灵”，小峰值电流的负地闪在合适条件下也能产生“红色精灵”[18]；对比研究发现，“红色精灵”的多寡和与之对应的雷暴云内粒子相态和垂直分布关系不明显，没有发现与“红色精灵”相联系的特殊特征，研究同时发现“红色精灵”的发生伴随着闪电频数的下降[19,20]。

4 系统评估气溶胶和云辐射效应，揭示华北大气环境管控措施的辐射效应

气溶胶是影响晴空地面辐射的主要参数。香河站科研团队基于长期连续高质量气溶胶、云和辐射观测数据，结合辐射传输模式，在国内首次分析了气溶胶直接辐射效应（图7），建立了辐射效应参数化方案，不仅考虑气溶胶对太阳总辐射的影响，同时在国际上较早系统考虑了气溶胶对散射辐射的影响[21,22]。

云是影响地表辐射能量收支的重要参数，云辐射效应（CRE）与云的宏微观特性参数密切相关。利用香河站高时间分辨率辐射测量数据，结合全天空成像仪观测数据，在云类型识别和云量（CF）估算基础上，重点探讨了云遮蔽和未遮蔽太阳两种情形下，云量和地表太阳辐射的参数关系。香河站CF年均值为0.50，夏季以积云为主（32%），发生频率约等于层云和卷云频率之和。CRE的年均值为−54.4 W·m^{-2}，冬季和夏季CRE分别为−29.5 W·m^{-2}和−78.2 W·m^{-2}。太阳未遮蔽情况下，CF变化主要影响散射辐射，CF与CRE呈线性关系。太阳被遮蔽情形下，CF变化同时影响直接辐射和散射辐射，导致CF与CRE非线性相关，

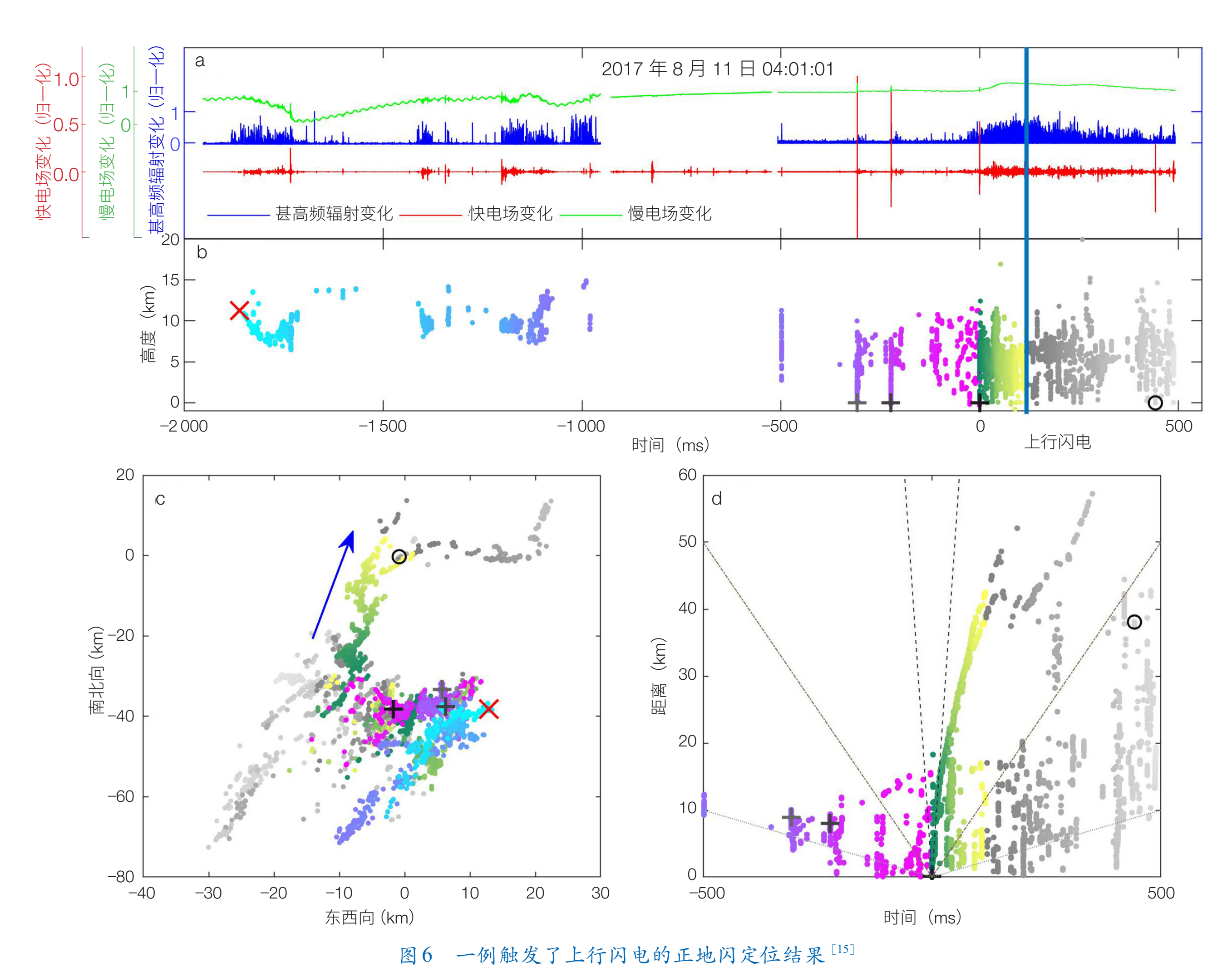


图6　一例触发了上行闪电的正地闪定位结果[15]

Figure 6　Location result of positive cloud-to-ground flash (+CG) that triggered bolt of tower-initiated upward lightning[15]

(a) 甚高频辐射、快电场变化及慢电场变化波形；(b) 放电辐射源高度随时间的演变；(c) 放电辐射源的水平投影；(d) 放电辐射源与第3次正地闪（+RS3）回击点距离随时间的演变。(b—d) 实心点颜色表示辐射源位置随时间的变化，即闪电通道的发展，红色×是闪电始发位置，黑色+是3次正地闪回击点位置，黑色o是高建筑物位置

(a) VHF radiation, fast E-field changes, and slow E-field changes; (b) time variation in altitude of located radiation; (c) plan view of located radiation; (d) time variation in distance to the third positive return stroke (+RS3). In (b–d), the color of solid points is time-coded to show the development of lightning channels. The red cross indicates the start of lightning. The black pluses give three ground terminations of +CG. The black circle represents the location of the tall building

斜率随CF增加而降低[23]。

近10年香河站太阳总辐射、直接辐射和散射辐射变化趋势分析表明总辐射和直接辐射增加，而散射辐射下降，表明气溶胶浓度下降，且气溶胶吸收下降是导致散射辐射下降的主要因素[24]。污染防控一方面可有效控制空气质量问题，同时也产生重要气候环境效应。在2013年我国《大气污染防治计划行动》实施以来，香河站科研团队发现我国中东部地区地表太阳辐射年均上升0.70—1.16 W·m^{-2}，快速下降的气溶胶辐射效应是导致地面太阳辐射显著上升的主要原因[25]，而云的变化对SSR趋势的贡献较小，空气污染控制在调节地面太阳辐射方面发挥着重要作用，进而对陆面生态系统和光伏发电产生重要影响。

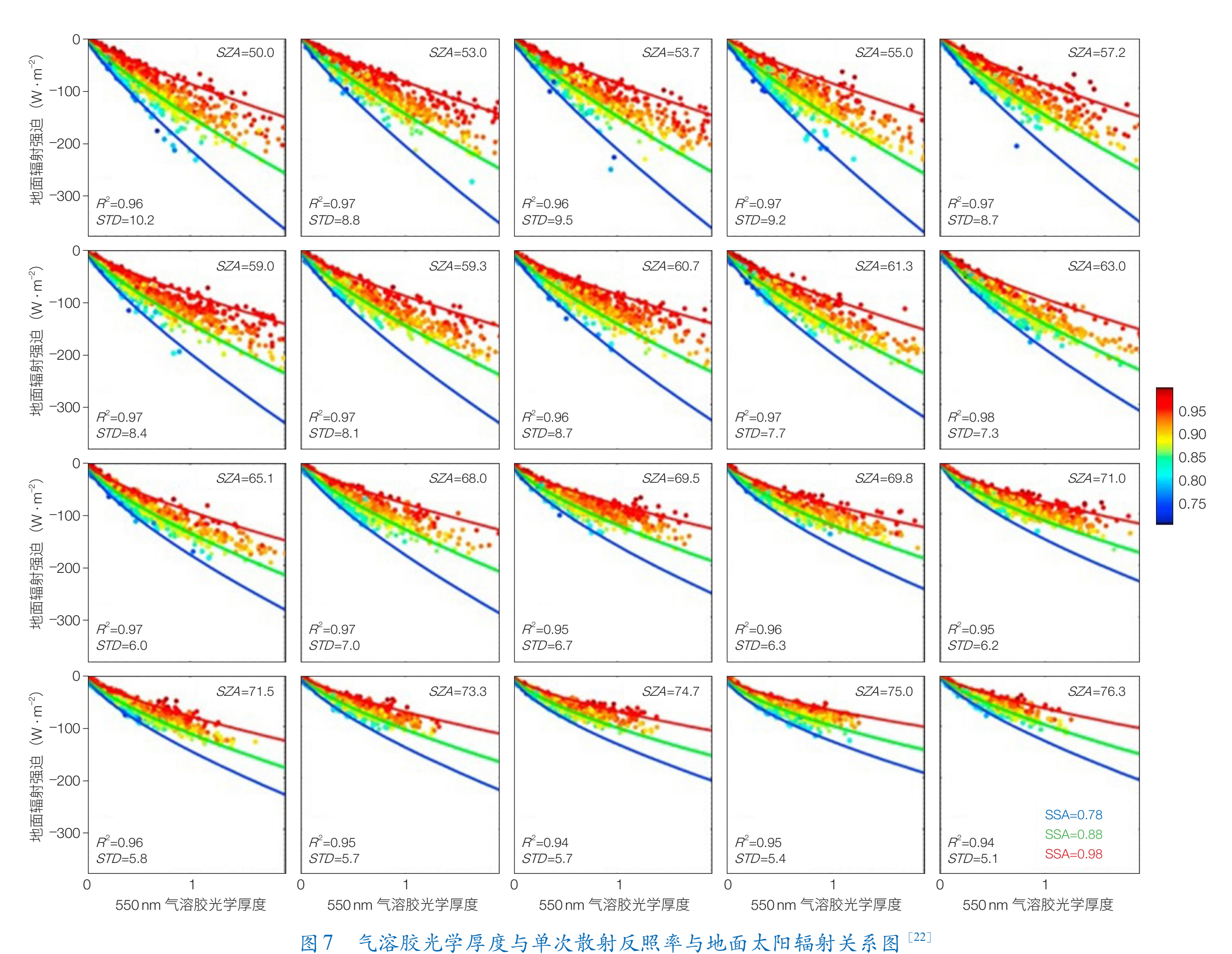


图 7　气溶胶光学厚度与单次散射反照率与地面太阳辐射关系图[22]

Figure 7　Function of surface solar radiation to aerosol optical depth and single scattering albedo[22]

散点：观测；实线：辐射传输模拟；SZA：太阳天顶角；SSA：单次散射反照率；STD：标准偏差

Scattering dot: observation; solid line: radiative transfer model simulations; SZA: solar zenith angle; SSA: single scattering albedo; STD: standard deviation

5 建立华北太阳能资源评估和短临预报系统

碳中和目标背景下，中国未来将显著增加光伏等新能源在能源结构中的占比。光伏太阳能的间接性和不稳定性是太阳能并网中的重大挑战之一。除了发展新能源储能等技术之外，发展太阳能短临预报技术是提高太阳能利用率的经济有效途径。我国新一代静止轨道气象卫星风云四号（FY-4）的发射给太阳能短临预报（< 3 h）提供了新的观测手段。

基于香河站高质量辐射观测数据，利用FY-4A多通道反射率数据建立了地表太阳辐照度估算和短临预报系统[26]。太阳辐照度估算方法采用物理晴天模型和经验云天模型混合估算方法，短临预报模型的核心是基于FY-4云指数推导云运动矢量，在此基础上预报未来3 h内地表太阳辐射。该系统能同时实现水平面总辐射和法向直接辐射的估算和短临预报。研究工作表明风云四号在地表太阳辐射短临预报中的广阔应用前景，将显著促进我国太阳光伏能源发展和利用。该系统在华北地区具备良好的性能，未来进一步改进将侧重于对地表太阳辐照度估算模型的校准并推广其

应用。

6 解析华北大气污染来源，保障国家重大活动

香河站科研团队自2004年开始便着手针对华北地区大气环境开展综合观测，组织多次国际合作观测计划，服务于大气污染专项治理。针对大气重污染发生—演变—消散全过程的核心科学问题，沿北京东南方向流场，利用香河大气超级观测站，形成了针对大气重污染全过程的闭合研究系统；开展了边界层气象和大气化学的同步观测，获取重污染过程气象要素、大气污染化学组成和边界层理化结构等关键参数，多角度地揭示了边界层气象和大气污染的演变规律，为深入研究秋冬季大气重污染形成机理提供精细化的数据集，针对大气复合型污染形成了一系列的科研成果[27,28]，为空气质量评估提供技术保障。研究结果表明，“煤改气”政策实施以来，京津冀乡村地区有机碳（OC）和黑碳（EC）浓度显著下降，日变化幅度也相应减小；禁煤区内总碳（OC和EC之和）和$PM_{2.5}$浓度水平下降幅度明显高于非禁煤区。相对于2016/2017年冬季，“煤改气”政策对2017/2018年和2018/2019年冬季EC浓度下降的贡献分别为26%和45%，气象条件的贡献分别为45%和15%。“煤改气”政策对2017/2018年和2018/2019年冬季一次OC和$PM_{2.5}$浓度下降的贡献分别为50%和33%，对$PM_{2.5}$浓度下降的贡献为66%和57%，清洁能源利用对空气质量持续改善发挥了重要的作用[29]。

7 结语与展望

国家野外科学观测研究站（简称“国家野外站”）是重要的国家科技创新基地之一，是国家创新体系的重要组成部分。通过几代人的不懈努力，香河站构建了从近地面到中高层大气的气候环境综合观测体系，开展了一系列气候环境野外观测工作，获取了一批宝贵的观测数据，多次为大型活动的环境保障等提供了有效支撑，服务大气环境和全球气候变化等重大基础科学问题的科学研究。科研人员基于香河站观测数据，获得了我国最长的臭氧总量和廓线、气溶胶光学和辐射探测数据，获取了涵盖从低层到90 km高度长期大气风场廓线数据，这些高质量、长期、连续、系统的综合大气关键要素的探测数据集的建立，在全球重大环境和气候问题的基础科学研究中发挥了重要作用。

本文介绍了香河站部分代表性研究成果，展望未来，香河站将不断开展先进探测仪器设备的研制和更新改造，主要从4个方面着手：① 建立以VHF/MST雷达、多波段激光雷达、GPS数字臭氧探空仪等为主的立体综合探测系统，将香河站建设成以中高层大气探测为核心，包括边界层物理化学过程探测的综合探测平台，以及集观测、试验与研究为一体的野外基地；② 通过香河站长期连续高质量探测数据的积累，紧密围绕中高层大气过程及天气气候效应核心科学问题，提升对中层大气基本过程、上下大气层交换过程和机理、臭氧层变化及气候效应等问题的认识；③ 完善我国华北地区气溶胶-云-辐射观测平台，加强大气参数和气溶胶廓线探测能力，加强水凝物廓线探测能力，发展大气和地表参数遥感验证方法和技术，结合卫星遥感手段和模式模拟手段，深入开展气溶胶-云-辐射-降水相互作用及其对区域乃至全球气候变化的影响研究；④ 积极加入国际观测网络，成为我国代表性站点加入国际碳卫星地面验证网，助力我国碳中和目标顺利实现，为我国在全球气候与环境谈判提供科技支撑。

参考文献

1 田玉芳, 吕达仁. 北京MST雷达探测中间层-低热层观测结果初步分析. 地球物理学报, 2016, 59(2): 440-452.

Tian Y F, Lü D R. Preliminary analysis of Beijing MST radar observation results in the mesosphere-lower thermosphere. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2): 440-452. (in Chinese)

2 Tian Y F, Lü D R. Comparison of Beijing MST radar and radiosonde horizontal wind measurements. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(1): 39-53.

3 陈泽, 田玉芳, 吕达仁. 北京MST雷达功率谱密度处理算法改进. 应用气象学报, 2020, 31(6): 694-705.

Chen Z, Tian Y F, Lü D R. Improving the processing algorithm of Beijing MST radar power spectral density data. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(6): 694-705. (in Chinese)

4 田玉芳, 陈泽, 吕达仁, 等. 大气探测雷达信号识别方法、装置、设备及介质. 中国, ZL 2020 1 0089236.2. 2021-09-21.

Tian Y F, Chen Z, Lü D R, et al. Atmospheric radar signal recognition method and the related device, equipment and medium. China, ZL 2020 1 0089236.2. 2021-09-21.

5 Chen Z, Tian, Y F, Wang Y N, et al. Turbulence parameters measured by the Beijing mesosphere − stratosphere − troposphere radar in the troposphere and lower stratosphere with three models: Comparison and analyses. Atmospheric Measurement Techniques, 2022, 15(16): 4785-4800.

6 Chen Z, Tian, Y F, Lü, D R. Turbulence parameters in the troposphere—Lower stratosphere observed by Beijing MST Radar. Remote Sensing, 2022, 14(4): 947.

7 Bian J C, Chen H B, Zhao Y, et al. Variation features of total atmospheric ozone in Beijing and Kunming based on Dobson and TOMS data. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19 (2): 279-286.

8 宣越健, 张金强, 徐群, 等. 双池臭氧探空传感器. 中国, ZL 2013 10136191.X. 2013-04-18.

Xuan Y J, Zhang J Q, Xu Q, et al. Double-cell ozonesonde sensor. China, ZL 2013 10136191.X. 2013-04-18.

9 Zhang J, Li D, Bian J, et al. Long-term ozone variability in the vertical structure and integrated column over the North China Plain: Results based on ozonesonde and Dobson measurements during 2001-2019. Environmental Research Letters, 2021, 16(7): 074053.

10 Wang Y, Konopka P, Liu Y, et al. Tropospheric ozone trend over Beijing from 2002-2010: Ozonesonde measurements and modeling analysis. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(18): 8389-8399.

11 Yuan S F, Qie X S, Jiang R B, et al. Origin of an uncommon multiple-stroke positive cloud-to-ground lightning flash with different terminations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(15): e2019JD032098.

12 王宇, 郄秀书, 王东方, 等. 北京闪电综合探测网(BLNET): 网络构成与初步定位结果. 大气科学, 2015, 39(3): 571-582.

Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. Beijing Lightning NETwork(BLNET): Configuration and preliminary results of lightning location. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(3): 571-582. (in Chinese)

13 Jiang R B, Qie X S, Wu Z J, et al. Characteristics of upward lightning from a 325-m-tall meteorology tower. Atmospheric Research, 2014: 149, 111-119.

14 Yuan S F, Jiang R B, Qie X S, et al. Characteristics of upward lightning on the Beijing 325 m meteorology tower and corresponding thunderstorm conditions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(22): 12093-12105.

15 Yuan S F, Qie X S, Jiang R B, et al. In-cloud discharge of positive cloud-to-ground lightning and its influence on the initiation of tower-initiated upward lightning. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(24): e2021JD035600.

16 Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. Red sprites over thunderstorms in the coast of Shandong Province, China. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(7): 1079-1086.

17 Yang J, Lu G P, Lee L-J, et al. Long-delayed bright dancing sprite with large Horizontal displacement from its parent flash. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2015, 129: 1-5.

18 Yang J, Liu N Y, Sato, M, et al. Characteristics of thunderstorm structure and lightning activity causing negative and positive sprites. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(15): 8190-8207.

19 Yang J, Yang M, Liu C, et al. Case studies of sprite-producing and non-sprite-producing summer thunderstorms.

Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(6): 1786-1808.
20 Yang J, Lu G P, Liu N Y, et al. Analysis of a mesoscale convective system that produced a single sprite. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(2): 258-271.
21 Xia X A, Li Z Q, Wang P C, et al. Estimation of aerosol effects on surface irradiance based on measurements and radiative transfer model simulations in northern China. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2007, 112 (D22): D22S10.
22 Xia X A, Chen H B, Zhu J, et al. Ground-based remote sensing of aerosol climatology in China: aerosol optical properties, direct radiative effect and its parameterization. Atmospheric Environment, 2016, 124(Part B): 243-251.
23 Liu M Q, Zhang J Q, Shi H R, et al. Data-driven estimation of cloud effects on surface irradiance at Xianghe, a suburban site in North China Plain. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(12): 2213-2223.
24 Li J, Jiang Y W, Xia X A, et al. Increase of surface solar irradiance across East China related to changes in aerosol properties during the past decade. Environmental Research Letters, 2018, 13(3): 034006.
25 Shi H R, Zhang J Q, Zhao B, et al. Surface brightening in eastern and central China since the implementation of the Clean Air Action in 2013: Causes and implications. Geophysical Research Letters, 2020, 48(3): e2020GL091105.
26 Huang C L, Shi H R, Gao L, et al. Fengyun-4 Geostationary satellite based solar energy nowcasting system and its application in North China. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(8): 1316-1328.
27 Huang W, Yang Y, Wang Y, et al. Exploring the inorganic and organic nitrate aerosol formation regimes at a suburban site on the North China Plain. Science of the Total Environment, 2021, 768: 144538.
28 Yang Y, Wang Y H, Zhou P T, et al. Atmospheric reactivity and oxidation capacity during summer at a suburban site between Beijing and Tianjin. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(13): 8181-8200.
29 Ji D, Li J W, Shen G F, et al. Environmental effects of China's coal ban policy: Results from *in situ* observations and model analysis in a typical rural area of the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Atmospheric Research, 2022, 268: 106015.

Integrated observation and research on climate and environment from boundary layer to middle and upper levels of atmosphere

XIA Xiang'ao TIAN Yufang WU Yunfei YANG Jing JI Dongsheng ZHANG Jinqiang ZHANG Renjian*
WANG Pucai CHEN Hongbin QIE Xiushu Lü Daren
（1 Xianghe Integrated Observatory of Climate and Environment, Langfang 065400, China;
2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China）

Abstract After more than 50 years of development, the Xianghe station (XH), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, has been equipped with comprehensive detection capabilities covering from the boundary layer to the middle and upper levels of the atmosphere. As one of the few atmospheric integrated field scientific test stations in the world, XH has joined a number of important networks. Many large international field campaigns have been carried out. Long-term continuous observation data are widely used to study exchange of energy and mass in the middle and upper atmosphere, atmospheric physical chemistry and air quality

*Corresponding author

in the boundary layer, as well as assess and forecast solar energy. We would pursue the continuous development of advanced detection instruments to improve our detection capabilities of the thermodynamic properties of the middle and upper atmosphere as well as the physical and chemical processes within the boundary layer. Observation, testing and research will then be integrated to improve our understanding of the critical processes of the middle atmosphere, weather and climate effect of air pollution control measures, thereby, providing technological support for national climate and environmental diplomacy and national security.

Keywords ozone, MST radar, aerosol-cloud-radiation interaction, air pollution, carbon monitoring

夏祥鳌 中国科学院大气物理研究所研究员。长期从事气溶胶-云-辐射相互作用和大气成分地基和卫星遥感研究。
E-mail: xxa@mail.iap.ac.cn

XIA Xiang'ao Professor of the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS). He has long been working on ground-based and satellite remote sensing of aerosol-cloud-radiation interactions and atmospheric composition.
E-mail: xxa@mail.iap.ac.cn

张仁健 中国科学院大气物理所研究员，香河气候与环境综合观测站站长。长期从事大气环境和大气化学研究。
E-mail: zrj@mail.iap.ac.cn

ZHANG Renjian Professor of the Institute of Atmospheric Physics, Director of Xianghe Integrated Observatory of Climate and Environment, Chinese Academy of Sciences (CAS). He has long been focusing on the research in atmospheric environment and atmospheric chemistry. E-mail: zrj@mail.iap.ac.cn

■责任编辑：张帆